DOI:10.11931/guihaia.gxzw201907017

龙胜县丘陵山区土壤与罗汉果重金属含量及潜在生态危害评价—以宝赠村为例

张德楠[1]，周龙武[1]，段春燕[2]，陈霞霞[2]，何文[1]，滕秋梅[1]，孙英杰[1]，张中峰[1]，徐广平[1*]

（1. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所，广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西 桂林 541006；2. 广西师范大学生命科学学院，广西 桂林 541004）

摘要：桂林市龙胜县作为罗汉果的三大主产区之一，种植区土壤重金属含量及罗汉果质量，影响到该区罗汉果产业的健康发展。为探索龙胜县丘陵山区典型贫困村罗汉果园的安全性，研究了宝赠村典型罗汉果园土壤及罗汉果果实中砷、铜、锌、铅、镉、铬、汞7种重金属含量，采用Hankanson指数法分析了其潜在生态风险。结果表明：①龙胜丘陵山区罗汉果园土壤（0-10 cm，10-20 cm）重金属含量均达到国家农业用地土壤筛选值标准（GB15618-2018），其中0-10cm土壤中砷、铜、锌、铅、镉、铬、汞的含量分别为3.67、18.00、58.39、17.01、0.10、28.57和0.08 mg • kg^{-1}，10-20cm土壤中砷、铜、锌、铅、镉、铬、汞的含量分别为1.93、12.56、21.47、10.51、0.04、17.09和0.02 mg • kg^{-1}。②0~10 cm和10~20 cm土层中重金属的生态风险状况总体上处于轻微生态风险等级，综合生态风险指数分别为105.29和38.96；0~10 cm土层不同重金属潜在的生态风险顺序为汞>镉>铅>铜>砷>锌>铬，汞、镉的生态风险分别为50.16、42.05，在总重金属风险中贡献率分别占所有重金属的47.6%和39.9%，已达中等生态风险等级。在10~20 cm土层，7种重金属的生态风险大小关系为镉>汞>铜>铅>砷>铬>锌。③,研究区罗汉果果实中砷、铜、锌、铅、镉、铬、汞的含量分别为0.000 24、0.273、1.10、0.001 6、0.000 13、0.000 13和0.000 12 mg·kg^{-1}，其生态风险状况均处于轻微风险等级，7种重金属的生态风险顺序为汞>铜>镉>锌>铅>砷>铬，综合生态风险指数为0.21193，几乎不存在生态风险。因此，在龙胜县丘陵山区典型贫困村宝赠村，推广种植的罗汉果达到了安全质量标准。

关键词：土壤，罗汉果，重金属，生态风险评价

中图分类号：Q142　　　　文献标识码：A

Contents and potential ecological risk assessment of heavy metals in soil and Siraitia grosvenorii at the hilly region in Longsheng County —Taking Baozeng Village as an example

ZHANG De-Nan[1], ZHOU Long-Wu[1], DUAN Chun-Yan[2], CHEN Xia-Xia[2],HE Wen[1], TENG Qiu-Mei[1],SUN Ying-Jie[1], ZHANG Zhong-Feng[1], XU Guang-Ping[1*]

（1. *Guangxi Institute of Botany，Guangxi Zhuang Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences，Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain,* Guilin 541006,China；2. *College of Life Sciences，Guangxi Normal University*，Guilin 541004，China）

Abstract: Longsheng County is one of the three main producing areas of *Siraitia grosvenorii* in Guilin city,the

基金项目：国家自然科学基金(31760162，41361057)；广西百色高新技术产业开发区引导项目(K-YS-SW-201801)；广西自然科学基金(2018GXNSFAA050069，2017GXNSFBA198037)；广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金(17-259-23)；广西科技攻关计划(桂科攻 1598016-12)；广西科技重大专项(桂科 AA18118028-4，桂科 AB18126065)；广西植物研究所基本业务费项目(17012，18007，18015)[Supported by the National Natural Science Foundation of China (31760162, 41361057); the Pilot-program of Guangxi Baise High-tech Industrial Development Zone(K-YS-SW-201801); the Natural Science Foundation of Guangxi (2018GXNSFAA050069, 2017GXNSFBA198037); Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain(17-259-23); Science and Technology Program of Guangxi(1598016-12); Science and Technology Major Program of Guangxi(AA18118028-4, AB18126065); Fundamental Research Fund of Guangxi Institute of Botany(17102,18007,18015)]。

作者简介：张德楠(1984-)，男，广西桂林人，硕士，助理研究员，从事环境生态学研究，(E-mail) denanzhang@126.com。

*__通信作者：__徐广平，博士，副研究员，主要从事土壤生态学与全球变化的研究，(E-mail) xugpgau@163.com。

content of heavy metals in soil and *S. grosvenorii* might affect the healthy development of *Siraitia grosvenorii* in this area. To explore the safety of *S. grosvenorii* Orchar County , heavy metals (As, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg) in the soil(0-10 cm,10-20 cm) and fruit of *S. grosvenorii* in the hilly region in Longsheng were measured, and their potential ecological risk were evaluated through Hankanson method. Results showed that: ①The average content of the heavy metals in the soil(0-10 cm,10-20 cm) of *S. grosvenorii* orchard reached the Eco-SSLs standard request of the national agricultural land evaluation criterion (GB-15618-2018), with the average values in soil(0-10cm) of As, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, and Hg were 3.67, 18.00, 58.39, 17.01, 0.10, 28.57 and 0.08 mg·kg^{-1}, and in soil(10-20cm)were 1.93, 12.56, 21.47, 10.51, 0.04, 17.09 and 0.02 mg·kg^{-1} respectively. ②The ecological risk status of heavy metals in soil (0-10 cm) of *S. grosvenorii* orchard in hilly region of Northern Guangxi was a low ecological risk generally. The average ecological risk index value at different points were 105.29, which represented a low ecological risk. The potential ecological risk decreased with the sequence of Hg, Cd, Pb, Cu, As, Cr and Zn, and all the metals except Hg and Cd had a low ecological risk. The potential ecological risk index caused by Hg and Cd reached 50.16 and 42.05, representing a moderate ecological risk, which contributed around 47.6% and 39.9% of the total potential ecological risk. ③The ecological risk status of heavy metals in soil (10-20cm) of *S. grosvenorii* orchard was a low ecological risk. The average ecological risk index value at different points were 38.96, which had a low ecological risk. The potential ecological risk decreased following the sequence of Cd, Hg, Cu, Pb, As, Cr and Zn. ④The average content of the heavy metals in the fruit of *S. grosvenorii* Orchard with the values of As, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg were 0.002 4, 0.273, 1.10, 0.001 6, 0.000 13,0.000 13 and 0.000 12 mg·kg^{-1} respectively, which represented a low ecological risk. The potential ecological risk decreased with the sequence of Hg, Cu, Cd, Zn, Pb, As and Cr. It was showed that the average ecological risk index value of different samples were 0.211 93, which was few at Baozeng village, which reached the safety and quality standard.

Key words: *Siraitia grosvenorii*, soil, heavy metal, ecological risk assessment

龙胜县地处广西北部，南岭山系的西南部，平均海拔低，气候温和，光照充足，四季分明，气候条件优越；土层深厚，耕作性好，宜发展各种旱地作物特别适合罗汉果种植。桂北地区做为罗汉果的栽培起源中心，在我国民间已有 300 多年的历史（白先达等，2009），其种植面积、产量占全国的 95%，全球 90%的罗汉果产自于桂北地区（曾其国，2012）。罗汉果作为药食两用及桂北地区重要进出口商品，其质量安全直接影响该地区的生态产业发展。开展土壤环境质量调查与评估等研究，有助于推进土壤潜在污染防治工作，从而促进区域农田生态系统健康、稳定和可持续发展（陈卫平等，2018）。因此，加强对罗汉果种植区土壤及罗汉果重金属元素等的研究，对于评价罗汉果质量安全和产地环境都至关重要。

环境中的重金属具有来源广、残毒时间长、不易被微生物分解等特点，会引起严重的环境问题（Loizidous M et al., 1991；Savvides C et al., 1995；范成新等，2002）；环境中的重金属通过各种方式在生态系统中迁移循环，最终可进入人体中，产生严重危害（文湘华，1993；贾振邦等，2001；徐争启等，2004a，2004b；王晓等，2006；丁振华等，2006）。近年来，国内学者对罗汉果的研究主要集中在种质资源（常放筝等，1981；李锋等，2008）、生态环境（彭云滔等，2005）、药理（周欣欣和宋俊生，2004；陈全斌等，2005a，2005b）、栽培技术（范承彪，2008）、化学成分（刘金磊等，2007）和开发利用（黎霜等，2003）等方面。近年来，在桂林市龙胜县中高海拔的丘陵山地也逐渐推广和试种罗汉果，在典型贫困村—乐江镇宝赠村，已建立“企业+科研院所+农户”的罗汉果种植模式，但该村有关土壤和罗汉果果实中重金属的污染及潜在生态危害评价方面的研究尚不清楚，因此，通过研究宝赠村罗汉果种植区土壤及罗汉果果实中的重金属含量，运用 Hakanson 指数法等对重金属的潜在生态危害进行评价，旨在为该地区的罗汉果产业的安全发展提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于广西北部罗汉果主产区—桂林市西北部的龙胜县。该区总面积2 538 km^2，109°43'-110°21' E，25°29'-26°12' N，东、南、北三面高而西部低，高、低海拔垂直高差1 777m，山峰与山坡呈阶梯状倾斜（陈建设等，2019）。选择的研究区域属丘陵山地，基岩裸露，土壤较为贫瘠，生态环境脆弱；属亚热带季风气候，年均气温18～19 ℃，大于或等于10 ℃的积温为5 064-6 383 ℃；年均日照时数1 237.3～1 626.4h，全年无霜期308～314 d；雨量充沛，年均降雨量为1 500-2 400 mm之间。罗汉果主要种植于海拔300～800m丘陵、坡地，土壤多由碳酸盐发育而来，由砂壤土和粘土组成红壤（曾其国，2012）。

2 材料与方法

2.1 采样方法

在广西桂林龙胜县乐江镇宝赠村罗汉果种植地（109°50'14" E，25°59'13" N，海拔523~650 m），选择具有代表性的不同海拔高度的3块种植地，每块地1ha，按照0-10 cm，10-20 cm土层采样，运用“五点采样法”，各采集同层5个点的土壤合并为1份样品，每份土壤样品1.5 kg，每样地采集土样3份。土壤样品经过前处理、风干、磨细过0.150 mm土壤筛备用。在土壤采样点，选取100 cm×100 cm的样方进行罗汉果采样，选取生长期为90～100 d，果柄泛黄，果皮青黄色的成熟青皮果罗汉果果实，每种植地采集3份罗汉果，每份罗汉果9个（大、中、小果各3个），将采集好的罗汉果样品保存于保鲜袋中带回实验室后放入烘箱恒温65 ℃下烤烘制成干燥果实样品，备后续实验分析用。

2.2 测试方法

采用IRIS1000ER/S型等离子体发射光谱仪(Therm Jerrell Ash Co.，USA)测定砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd）、铬(Cr)和汞(Hg)的元素含量（沈育伊等，2012），工作参数为：高频功率1 150 W，雾化器压力为30.06 psi (1 psi=6.89×10^3 Pa)，辅助气流量0.5 L•min^{-1}，蠕动泵转速100 r•min^{-1}，进样清洗时间45 s，提升量1.85 mL•min^{-1}；仪器检测的最低极限值<0.00001。微波消解仪(德国，ETHOS1)功率为1 000 W，微波消解程序：20～180 ℃，升温10 min，180 ℃保持20 min；180℃～20 ℃，降温30 min。所用化学试剂均为分析纯，实验室用水为超纯水(Elga purel ab Classic超纯水机系统，英国Elga公司)；ER-180A万分之一全自动分析天平(日本岛津)、电热恒温干燥箱(上海实验仪器厂)等；As、Cu、Zn、Pb、Cd、Cr和Hg的标准溶液(国家钢铁材料测试中心提供)均用1% HNO_3配制而成；称取试样0.500 0 g置于石英消解罐中，加8ml硝酸于微波消解仪中按照程序进行消解；同时做样品空白对照，待消化完全后取下，放在消解器上加热，赶酸，待溶液体积为0.5 ～1.0 mL时将其转移到50 mL容量瓶中，反复清洗消解罐，合并移入容量瓶中，并用超纯水定容至刻度。土壤和植物样品中元素含量以干物质中元素的质量分数表示。

2.3 单因子污染指数法

利用单因子污染指数法，评价土壤和罗汉果果实中重金属污染物的超标情况。具体如下：

$$PI_i = C_i / S_i \quad (1)$$

其中，PI_i为采样点的重金i的污染指数，C_i为该样点重金属i的实测含量，S_i为重金属i的评价标准含量。

2.4 土壤及罗汉果果实潜在风险评价方法

采用瑞典科学家Hakanson提出的潜在生态危害指数法，对土壤及罗汉果果实进行评价（徐争启等，2008）。通过分析土壤及罗汉果果实中各个重金属污染物的释放能力和生物毒性强度，将土壤及罗汉果果实中污染物的含量折算成生物毒性风险；对于多种重金属共存情况，通过加和的处理方式来衡量。计算方法如下：

$$E^i_n = T^i_r \cdot S^i_s / C^i_n \quad (2)$$

$$RI = \sum E^i_n \quad (3)$$

其中，E_r^i为重金属i的潜在生态风险指数，T_r^i为重金属i的毒性系数（见表1）（徐争启等，2008），S_s^i为重金属i的实测值，C_n^i为重金属i的评价参考值，该研究选用广西土壤重金属背景值为参考值（见表1）（杨胜香等，2006；程峰，2014；赵慧芳等，2016；王佛鹏等，2018）；RI为土壤及罗汉果果实中重金属污染物的综合潜在生态风险指数。Hakanson的潜在生态风险指数法对污染程度的划分如表2 所示。

表1 土壤中重金属参考值和毒性系数

Table 1 Background reference values and toxicity coefficients of heavy metals in soils

重金属元素 Heavy metal	砷 (As)	铜 (Cu)	锌 (Zn)	铅 (Pb)	镉 (Cd)	铬 (Cr)	汞 (Hg)
参考值 C_n^i (mg·kg^{-1})	13.0	23.1	51.8	19.5	0.073	66.3	0.063
毒性系数 T_r^i	10	5	1	5	30	2	40

表2 Hakanson潜在生态风险指数法对污染程度的划分（徐争启等，2008）

Table 2 Hakanson potential ecological risk and index for pollution level classification

潜在风险指数 E_r^i Potential risk index	综合风险指数 RI Comprehensive risk index	潜在生态风险程度 Potential ecological risk level
<40	<135	轻微生态风险 Low ecological risk
40-80	135-265	中等生态风险 Moderate ecological risk
80-160	265-525	强生态风险 Strong ecological risk
160-320	≥525	很强生态风险 More strong ecological risk
≥320		极强生态风险 The most strong ecological risk

2.5 数据处理

利用Excel 2007和SPSS19 软件进行数据统计分析，对不同重金属污染物进行方差分析，对土壤不同重金属元素含量进行Pearson 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 龙胜丘陵山区罗汉果园土壤中重金属的含量分析

本次调查土壤样品中的7种重金属平均含量均远低于国家农业用地土壤环境质量标准限值（GB15618-2018），说明桂北典型丘陵山区宝赠村罗汉果果园土壤均达到国家农用地土壤筛选值标准。0-20cm土壤中重金属含量由高至低为：锌>铬>铜>铅>砷>镉>汞（表3），所有样点中土壤均可满足罗汉果培育等用地要求。

表3 土壤中重金属含量

Table 3 Heavy metals content in soil

（mg·kg^{-1}）

重金属元素 Heavy metal	砷 As	铜 Cu	锌 Zn	铅 Pb	镉 Cd	铬 Cr	汞 Hg	来源 Source
土壤Soil (0-10 cm)	3.67±0.38	18.00±1.71	58.39±3.67	17.01±1.60	0.10±0.01	28.57±2.38	0.08±0.02	该研究
土壤Soil (10-20 cm)	1.93±0.07	12.56±0.64	21.47±1.78	10.51±0.90	0.04±0.01	17.09±1.26	0.02±0.01	该研究
土壤标准（筛选值）	30	150	200	80	0.3	250	0.5	GB15618-2018

Eco-SSLs								
土壤标准（管制值）Control value	200	-	-	400	1.5	800	2.0	GB15618-2018
桂东北农业土壤值 Northeast Guangxi background value of agricultural soil	10.82	23.78	72.61	29.95	0.1853	70.18	0.1291	（郑武，1993）
西江流域背景值 Xijiang River basin background value of soil	25.23	26.51	116.20	94.06	1.18	93.89	0.063	(王佛鹏等，2018)
全国土壤背景值 National background value of soil	9.7	20.0	67.7	23.6	0.074	53.9	0.065	(中国环境监测总站，1990；杨胜香等，2006；程峰，2014)

注：表中数据为平均值±标准差，“-”未检测。下同。

Note: the data in the table mean ± standard deviation, "-" has not been tested. The same below.

龙胜丘陵山区宝赠村罗汉果果园土壤（0-10cm）中7种重金属的平均值均低于桂东北农业土壤中重金属含量，除汞以外的其他6种重金属含量均低于西江流域背景值和全国土壤背景值。基于桂东北农业土壤重金属含量值，符合正常标准范围内数据，说明该研究区域内土壤质量优于桂东北农业土壤；该研究土壤（10-20cm）中7种重金属的平均值均低于桂东北农业土壤、西江流域背景值和全国土壤背景值，随土层深度增加其重金属含量随之减少。

3.2 龙胜丘陵山区罗汉果果实中重金属的含量分析

表4数据表明，研究区域罗汉果果实中7种重金属含量达到了国家食品污染物限量标准，砷、铅、镉、铬和汞在果实中的含量几乎接近于零；该研究中的罗汉果果实重金属砷、铜、铅、镉和汞含量完全符合药用植物绿色行业标准（WM/T2-2004）。

表4 罗汉果果实中重金属含量

Table 4　Heavy metals content in fruit of *Siraitia grosvenorii*

（$mg \cdot kg^{-1}$）

重金属元素 Heavy metal	罗汉果果实 Fruit of *Siraitia grosvenorii*	绿色行业标准 Green Industry Standard	永福罗汉果 Fruit from Yongfu	临桂罗汉果 Fruit from Lingui	龙胜罗汉果 Fruit from Longsheng	粮食（谷类） Cereals
砷 As	0.00024±0.00007	≤2.0	0.25	0.33	0.00019	0.5
铜 Cu	0.273±0.04	≤20.0	4.15	5.36	0.15	10
锌 Zn	1.10±0.06	-	-	-	-	50
铅 Pb	0.0016±0.0006	≤5.0	0.87	1.26	0.006	0.2

镉 Cd	0.00013±0.00001	≤0.3	0.24	0.33	0.00056	0.1
铬 Cr	0.00013±0.00002	-	-	-	-	1
汞 Hg	0.00012±0.00001	≤0.2	0.01	0.03	0.0002	0.02
来源 Source	该研究 The study	WM/T2-2004	李斐，2007	李斐，2007	曾其国，2012	GB15199-1994 GB13106-1991 GB2762-2012

3.3 龙胜丘陵山区罗汉果园土壤与果实中重金属的生态风险分析

表5数据显示，龙胜丘陵山区罗汉果园表层土壤（0-10cm）中重金属的生态风险状况总体上处于轻微生态风险等级，7种重金属的生态风险顺序为汞>镉>铅>铜>砷>锌>铬。所有重金属中汞的生态风险值最高（50.16），平均生态风险达到了中等生态风险强度，镉的生态风险值次之（42.05），平均生态风险亦达到中等生态风险强度；汞和镉在重金属生态风险中的贡献率分别占所有重金属的47.6%和39.9%。汞、镉生态风险较高与汞、镉的生物毒性较高和近年来累积速度较快有关。

10~20 cm层土壤中重金属的生态风险状况均处于轻微生态风险等级，7种重金属的生态风险大小关系为镉>汞>铜>铅>砷>铬>锌。罗汉果果实中重金属的生态风险状况均处于轻微风险等级，7种重金属的生态风险大小表现为汞>铜>镉>锌>铅>砷>铬，其生态风险值非常低，几乎不存在风险。

表5 土壤及罗汉果果实中重金属的潜在生态风险

Table 5 Potential ecological risk of heavy metals in soil and fruit of *Siraitia grosvenorii*

重金属元素 Heavy metal	砷 As	铜 Cu	锌 Zn	铅 Pb	镉 Cd	铬 Cr	汞 Hg	RI
土壤Soil (0-10 cm)	2.83	3.90	1.13	4.36	42.05	0.86	50.16	105.29
土壤Soil (10-20 cm)	1.49	2.72	0.41	2.69	15.89	0.52	15.24	38.96
罗汉果果实 Fruit of *Siraitia grosvenorii*	0.00019	0.05916	0.02117	0.00042	0.05479	0.00000	0.07619	0.21193

3.4 龙胜丘陵山区罗汉果园土壤中重金属的相关性分析

相关性分析表明：土壤金属镉与铬之间相关性不显著（P=0.527，r=0.038），镉与锌具有较好的相关性（P=0.839，r=0.002），类金属砷和汞具有较好的相关性（P=0.635，r=0.001）。重金属和类金属之间的相关性说明这些重金属和类金属有一定的同源性（张雷等，2011）。

4 讨论与结论

龙胜丘陵山区宝赠村罗汉果果园土壤（0~10 cm）重金属砷、铜、锌、铬的含量相对于背景值没有明显的变化，锌、镉和汞的含量有所升高，含量达到了背景值的1.1倍，但未超过国家农用地土壤筛选值标准；汞含量低于郑武（1993）测定的桂东北地区农业土壤的汞含量，这可能与研究区域周边无汞的污染源，地处贫困深山区，土壤未受到污染有关。

该研究区域罗汉果果实中7种重金属含量远低于国家标准中食品污染物限量，砷、铅、镉、铬和汞在果实中的含量几乎已达到仪器检测的最低极限值，铜和锌远低于国家标准，仅为国标的0.0273和0.022倍，这与有关学者（曾其国，2012）在龙胜县开展的研究结果相似。与同属桂北罗汉果主产区临桂和永福的罗汉果果实重金属含量（李斐，2007）相比较表明，该研究中的罗汉果果实重金属砷、铜、铅、镉和汞仅为上述两地罗汉果重金属含量的1/1000、1/20、1/1 000、1/2 000和1/100；该研究中的罗汉果果实重金属砷、铜、铅、镉和汞含量完全符合药用植物绿色行业标准（WM/T2-2004），仅为此标准值的1/10 000、1/100、

3/10 000、1/2 500和3/2 500，由此证明研究区域内产的罗汉果更绿色、安全，也表明该区域种植和发展罗汉果产业是安全和可行的。

综上所述，龙胜丘陵山区典型贫困村宝赠村罗汉果果园土壤重金属含量远低于国家农业用地土壤环境质量标准限值，该区域土壤均达到国家农用地土壤筛选值标准。表层土壤（0~10 cm）中重金属的生态风险状况总体上处于轻微生态风险等级，7 种重金属的生态风险顺序为汞>镉>砷>铅>铜>砷>锌>铬。所有重金属中汞、镉的生态风险较高，在总重金属风险中贡献率分别占所有重金属的47.6%和39.9%，达到了中等生态风险等级。土壤（10~20 cm）中重金属的生态风险状况均处于轻微生态风险等级，7种重金属的生态风险顺序为镉>汞>铜>铅>砷>铬>锌。龙胜丘陵山区典型贫困村宝赠村罗汉果果实中重金属的生态风险状况均处于轻微风险等级，7种重金属的生态风险顺序为汞>铜>镉>锌>铅>砷>铬，几乎不存在生态风险，可放心入药和食用。因此，建议在龙胜典型丘陵山地宝赠村及周边的贫困山区，罗汉果可作为优先发展的绿色产业来种植和推广。

致 谢：感谢程桂霞，刘建春，蒋玉龙等在实验样品分析方面提供的帮助!

参考文献：

BAI XD, ZHAO H,TANG GS, et al., 2009. Analysis of meteorological condition influence on growth of *Siraitia grosvenori* [J]. Acta Agric Jiangxi, 21(7): 113-116. [白先达，赵洪，唐更生，等，2009. 气象条件对罗汉果生长影响的分析 [J]. 江西农业学报，21(7) : 113-116.]

CHANG FS, LI HQ, 1981. Preliminary investigation and study on raw plants, resources and ecological environment of *Siraitia grosvenorii* [J]. Chin Pharm J, 16(4): 161-163. [常放箏，李海泉，1981. 罗汉果原植物及其资源概况、生态环境的初步调查研究[J]. 中国药学杂志，16(4): 161-163.]

CHEN JS, CAO LM, SU XZ, et al., 2019. Ethnobotany knowledge of traditional medicinal plants among hong-yao in Longsheng, Guangxi [J]. Guihaia, 39(3): 375-385. [陈建设，曹丽敏，粟新政，等，2019.广西龙胜红瑶传统药用植物的民族植物学知识[J]. 广西植物，39(3)：375-385.]

CHEN QB, SHEN ZS, WEI ZB, et al., 2005a.The study on the pharmacological function of stimulate circulation to end stasis of flavone from *Siraitia grosvenorii* [J]. Guangxi Sci, 12(4): 316-319. [陈全斌，沈钟苏，韦正波，等，2005a. 罗汉果黄酮的活血化瘀药理作用研究[J]. 广西科学，12(4): 316-319.]

CHEN QB, YANG JX, CHENG ZQ, et al., 2005b. The determination of total flavonoids in *Momordica grosvenorii* leaf by RP-HPLC [J]. Guangxi Sci, 12(1): 43-45. [陈全斌，杨建香，程忠泉，等，2005b. RP-HPLC法测定罗汉果叶中总黄酮含量[J]. 广西科学，12(1): 43-45.]

CHEN WP, YANG Y, XIE T, et al., 2018. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China [J]. Acta Pedol Sin, 55(2):261-272.[陈卫平，杨阳，谢天，等，2018.中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J].土壤学报，55(2):261-272.]

CHENG F, 2014. Researchs on mechanical properties and curing measures of rock-soil invaded by heavy metals [D]. Changsha: Central South University. [程峰，2014.重金属侵入下岩土的力学特性及固化机理研究[D]. 长沙：中南大学.]

DING ZH, JIA HW, LIU CE, 2006. Pollution and assessment of heavy metals in Huangpu river sediments [J]. Environ Sci Technol, 29(2): 64-65. [丁振华，贾洪武，刘彩娥，2006. 黄浦江沉积物重金属的污染及评价[J]. 环境科学与技术，29(2): 64-65.]

Environmental monitoring of China, 1990. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press: 330-382. [中国环境监测总站，1990.中国土壤元素背景值[M]. 北京：中国环境科学出版社，330-382.]

FAN CB, 2008. Preliminary report on cultivating *Siraitia grosvenorii* in the flat [J]. Guangxi Trop Agric, (1): 6-7.

[范承彪，2008. 罗汉果组培苗平地栽培试验初报[J]. 广西热带农业，(1): 6-7.]
FAN CX, ZhU YX, 2002. Characteristics of pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu basin[J]. J Lake Sci, 14(3): 235-241. [范成新，朱育新，2002. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征[J]. 湖泊科学，14(3): 235- 241.]
HAKANSON L,1980. An ecological risk index for aquatic pollution control — A sediment logical approach [J]. Water Res, 14(8): 975-1001.
JIA ZB, ZHAO ZJ, YANG XM, et al., 2001.Pollution and assessment of heavy metals in Yangyong River, Maozhou River and Dongbao River sediments, Shenzhen [J]. Environ Chem, 20(3): 212- 219. [贾振邦，赵智杰，杨小毛，等，2001.洋涌河、茅洲河和东宝河沉积物中重金属的污染及评价[J]. 环境化学，20(3): 212-219.]
LI F, 2007. The research on maximum limited standards for contaminants in *Siraitia grosvenorii* [D]. Changsha: Central South University of Forestry Science and Technology. [李斐，2007.中药材罗汉果中污染物限量标准研究[D]. 长沙：中南林业科技大学.]
LI F, JIANG XJ, JIANG SY, et al., 2008. The successful culture of seedless *Siraitia grosvenorii*[J]. Guihaia, 28(6): 727. [李锋，蒋向军，蒋水元，等，2008. 无籽（少籽）罗汉果培育成功[J]. 广西植物，28(6): 727.]
LI S, WANG HS, ZHANG GY, 2003. Chemical constituent in seed of *Siraitia grosvenorii*[J]. Guangxi Med J, 25(5): 850-852. [黎霜，王恒山，张桂勇，2003. 罗汉果种子油化学成分研究[J]. 广西医学，25(5): 850-852.]
LING NG,2010. Analysis of heavy metal content in different farmland soils in guangxi[J]. J Agric Resourc Environ , 27(4):91-94. [凌乃规. 2010.广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J].农业环境与发展，27(4):91-94.]
LIU JL, LI DP, HUANG YL, 2007. Determination of mogrol glycocides and mogroside V content in the fresh fruit of some *Siraitia grosvenorii* varieties from different places in North Guangxi [J]. Guihaia, 27(2): 281-284. [刘金磊，李典鹏，黄永林，2007. 桂北地区不同品种、不同产地鲜罗汉果中总甙、甙V含量测定[J]. 广西植物，27(2):281-284.]
LOIZIDOUS M, HARALAMBOUS KJ, SAKELLARIDES PO, 1991. Chemical treatment of sediments contaminated with heavy metals[C] // 8th International Conference Heavy Metals in the Environment, Edinburgh.
PENG YT, TANG SQ, LI BL, et al.,2005. Genetic diversity of *Siraitia grosvenorii* detected by ISSR markers[J]. Biodivers Sci, 13(1):36-42. [彭云滔，唐绍清，李伯林，等，2005. 野生罗汉果遗传多样性的ISSR分析[J]. 生物多样性，13(1):36-42.]
RAN HX,ZHOU P,XIE MQ, et al.,2019.Heavy metal pollution and control in soil-taking Guangxi as an example [J]. Environ Dev , 31(4):23-24. [冉浩学，周朋，谢名淇，等，2019.土壤重金属污染与防治—以广西为例[J].环境与发展，31(4):23-24.]
SAVVIDES C, PAPADOPOULOS A, HARALAMBOUS KJ, et al.,1995. Sea sediments contaminated with heavy metals:metal speciation and removal[J].Wat Sci Technol, 32(9-10): 65-73.
SHEN Y Y, ZHOU Y H, CHEN H SD, et al., 2012. Determinations of trace elements and amino acids in *Thalictrum baicalense* Turcz[J]. Guangdong Agric Sci, 39(14):116-118. [沈育伊，周玉恒，陈海珊，等，2012. 贝加尔唐松草微量元素和氨基酸含量测定[J].广东农业科学，39(14):116-118.]
WANG FP, SONG B, ZHOU L, et al., 2018. Redistribution of heavy metal background in soil of Xijiang river basin in Guangxi [J]. Acta Sci Circumst, 38(9): 3695-3702. [王佛鹏，宋波，周浪，等，2018. 广西西江流域土壤重金属背景值再研究[J]. 环境科学学报，38(9): 3695-3702.]
WANG X, HAN BP, 2006. Heavy metal pollution in bottom sediments of abandoned Yellow River, Xuzhou [J]. Environ Sci Technol, 29(11): 1- 2, 38. [王晓，韩宝平，2006. 徐州市区故黄河底泥重金属污染研究[J]. 环境科学与技术，29(11): 1- 2, 38.]
WEN XH, 1993. Sediment quality criteria for heavy metals [J]. Environ Chem, 12(5): 334- 341. [文湘华，1993. 水体沉积物重金属质量基准研究[J]. 环境化学，12(5): 334- 341.]

XU ZQ, NI SJ, TUO XG, et al., 2008. Calculation of Heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environ Sci Technol, 31(2): 112-115. [徐争启，倪师军，庹先国，等，2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术，31(2): 112-115.]

XU ZQ, NI SJ, ZHANG CJ, et al., 2004a. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua area by pollution load index [J]. Sichuan Environ, 23(3): 67- 67. [徐争启，倪师军，张成江，等，2004. 应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属 [J]. 四川环境，23(3): 67-67.]

XU ZQ, NI SJ, ZHANG CJ, et al., 2004b. The distribution charactristics and evaluation of heavy metals of Jinsha River sediments in Panzhihua [J]. Comput Techniqu Geophysical Geochemical Expl, 26(3): 252-255. [徐争启，倪师军，张成江，等，2004. 金沙江攀枝花段水系沉积物中重金属的分布特征及污染评价 [J]. 物探化探计算技术，26(3)：252-255.]

YANG SX, LI MS, LI Y, et al., 2006. Study on heavy metal pollution and ecological restoration of soil and plant in Pingle manganese mine area of Guangxi [J]. Min Safety & Environ Prot, 33(1): 21-23. [杨胜香，李明顺，李艺，等，2006. 广西平乐锰矿区土壤、植物重金属污染状况与生态恢复研究[J]. 矿业安全与环保，33(1): 21-23.]

ZHANG L, QIN YW, ZHENG BH, et al., 2011. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from typical areas in the Bohai Sea [J]．Acta SciCircumst, 31(8): 1676-1684. [张雷，秦延文，郑丙辉，等，2011. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报，31(8): 1676-1684.]

ZENG QG, 2012. Agro-Geology of *Siraitia grosvenorii* in karst peek-cluster ecosystem in north Guilin, Guangxi [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. [曾其国，2012. 广西桂北峰丛岩溶生态区罗汉果的农业地质研究 [D]. 成都: 成都理工大学.]

ZHAO HF, YAN HY, WANG X, et al., 2016. Mercury concentrations and potential risk assessment of paddy soil in south China [J]. Asian J Ecotoxicol, 11(6): 252-258. [赵慧芳，闫海鱼，王训，等，2016. 中国南方稻田土壤汞含量及潜在危害评价[J]. 生态毒理学报，11(6): 252-258.]

ZHENG W, 1993. Investigation on background values of several heavy metal elements in agricultural soil environment in northeast Guangxi [J]. J Ecol Rural Environ, (4): 39-42. [郑武，1993. 广西桂东北地区农业土壤环境若干重金属元素背景值的调查[J]. 农村生态环境，(4): 39-42.]

ZHOU XX，SONG JS, 2004. Study on pharmacology of *Mo-mordica grosvenorii* extracts [J]. Study J Trad Chin Med, 22(9): 1723-1724. [周欣欣，宋俊生，2004. 罗汉果及罗汉果提取物药理作用的研究[J]. 中医药刊，22(9): 1723-1724.]

ZHU ZL, JIN JY, 2013. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutr Fert Sci, 19(2)：259-273.[朱兆良，金继运.2013.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报，19(2)：259-273.]